МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 536.248.2.001.24 DOI 10.12737/22167

Проблема критической области теплоотдачи и движения энергии при кипении бинарных смесей жидкостей*

Е. В. Лыков[1], В. В. Романов[2], Е. С. Желонкина[3]**
[1,2,3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Problem of critical area of heat transfer and energy motion under liquid binary mixtures boiling ***

E. V. Lykov[1], V. V. Romanov[2], E. S. Zhelonkina[3]**
[1,2,3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Приводятся экспериментальные результаты исследования критической плотности теплового потока при ненасыщенном кипении бинарных смесей вода-н-бутанол и вода-н-пентанол в пределах концентраций от 0 до 100% по весу органического компонента. В исследуемых бинарных жидкостях определены составы, которые имеют максимальный (пиковый) критический тепловой поток. При этом выявлены некоторые парадоксы в кипении данных смесей и особенности форм кривых $q_{кр}(x)$. Проводятся сопоставления полученных результатов исследования в области кипения бинарных смесей с раннее полученными. На основании этого анализа делается вывод о том, что проблема критической области теплоотдачи связана с существованием предела потока тепловой энергии при кипении бинарных жидких смесей. Плотность поступающей энергии ограничена той средой, через которую она течет. Эта фундаментальная закономерность, установленная авторами, может трактоваться как закон предела потока энергии в среде.

Ключевые слова: кипение, критическая область теплоотдачи, критическая плотность теплового потока, предел потока энергии, бинарные смеси, кипение.

The experimental results of the heat flux critical density studying under the unsaturated boiling of the binary mixtures of water-n-butanol and water n-pentanol within the concentrations from 0 to 100% by weight of the organic component are provided. The compositions with the maximum (peak) critical heat flux in the binary liquids under study, are determined. At that, some paradoxes in the boiling of these mixtures and in the singularities of the curve shapes qкр(x) are revealed. The comparison of the research results obtained in the area of the binary mixtures boiling with the earlier data is carried out. On the basis of this analysis, it is concluded that the critical zone of the heat transfer is connected with the existence of the thermal energy flux limit under the binary liquid mixtures boiling. The incoming energy density is limited by the environment through which it flows. This fundamental regularity established by the authors can be interpreted as a law of the energy flux limit in the environment.

Keywords: boiling, a critical area of heat transfer, critical heat flux density, the limit of energy flow, binary mixture.

Введение. Актуальность изучения критической области теплоотдачи при кипении жидкостей объясняется развитием энергетики больших мощностей и связана с существованием в природе малоизученного ограничения плотности потока энергии. Об этом факте упоминали в своих трудах Н. А. Умов [1], а затем П. Л. Капица [2]. Это ограничение не учитывается при проектировании энергетических установок, поэтому часто такие проекты становятся бесперспективными [2]. Ограничение плотности потока энергии связано с физическими свойствами той среды, через которую она движется, примером этого ограничения является возникновение кризиса теплоотдачи при кипении жидкостей.

В результате экспериментальных исследований авторами было установлено, что для исследования кризиса кипения необходимо синхронно определять зависимости коэффициента теплоотдачи α от температуры нагревателя — $\alpha(t)$ и плотности теплового потока q от температуры — q(t) [3]. При этом оказалось, что обе кривые имеют максимум, который наступает при разных температурах, так что максимум кривой $\alpha(t)$ имеет место всегда при температуре меньшей, чем максимум кривой q(t). Это позволяет авторам выдвинуть новую — тепловую, а не гидродинамическую теорию кризиса кипения.

---

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: romanov.victor33@mail.ru, elena-simonenko@indox.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Основная часть. Известно, что энергетические процессы сводятся к трансформации одного вида энергии в другой согласно закону сохранения энергии. Закон, по которому трансформация энергии происходит в некотором объеме данной среды, был открыт знаменитым русским физиком Н. А. Умовым [1]. Плотность поступающей энергии U, ограничена физическими свойствами той среды, через которую она течет. В материальной среде эта плотность потока энергии формулируется следующим выражением [2]:

$$\vec{U} < \rho_э \cdot \vec{\upsilon}_э \tag{1}$$

где $\upsilon_э$ — скорость распространения деформации (энергии), обычно равная скорости звука, $\rho_э$ — плотность энергии, которая может быть либо упругой, либо тепловой.

Открытие закона ограничения плотности потока энергии (1) является важным достижением в науке и по значимости является равным I и II законам термодинамики. С помощью этого закона (1) можно объяснить причину кризиса теплоотдачи при кипении жидкостей на теплонапряженных поверхностях.

С. Нукияма исследовал кипение насыщенной воды на тонком цилиндрическом нагревателе и обнаружил минимальный и максимальный тепловой поток, отходящий от нагретой поверхности, а также определил соответствующие температуры поверхности нагревателя [4]. При росте температуры поверхности нагрева до 125^{0}С плотность теплового потока увеличивается, проходит точку максимума, затем с увеличением температуры уменьшается до минимального значения. При этом температура поверхности нагревателя изменяется от 225 до 300^{0}С.

Анализируя экспериментальные данные в работе [5], авторами была рассчитана зависимость коэффициента теплоотдачи α от температурного напора ΔT (рис.1).

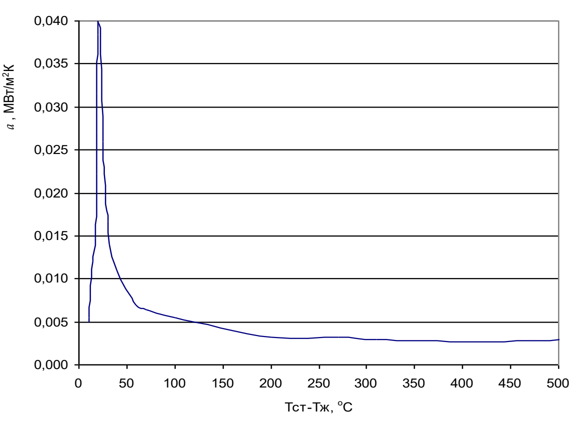


Рис.1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температурного напора в насыщенной воде

Оказывается, что существует узкий интервал температуры нагревателя, при котором коэффициент теплоотдачи достигает максимальной (критической) величины, а при дальнейшем росте температуры нагревателя коэффициент теплоотдачи резко уменьшается. Это важное явление до сих пор не изучено в кипящих бинарных смесях.

Величину критической плотности теплового потока $q_{кр}$ кипящей воды на теплонапряженной поверхности в работе [6] определил Н. Зубр.

$$q_{кр} = \pi/_{24} \cdot L \cdot \sqrt{\rho'' g (1 + \rho''/_{\rho'})} \cdot \sqrt[4]{\sigma(\rho' - \rho'')} \tag{2}$$

Здесь ρ'', ρ' — плотность пара и жидкости при критическом тепловом напоре, $\frac{кг}{м^3}$, L — теплота парообразования, $\frac{Дж}{кг}$.

На рис. 2. представлены экспериментальные результаты зависимости критического теплового потока $q_{кр}(x)$ от концентрации органического компонента. Авторами была обнаружена интересная закономерность в кривых зависимости q(x). Оказывается, что существует такой состав бинарной системы, при котором критический тепловой поток максимальный. Характер распределения зависимости q(x) от физических свойств конкретного состава бинарной жидкости представлен на рис.2.

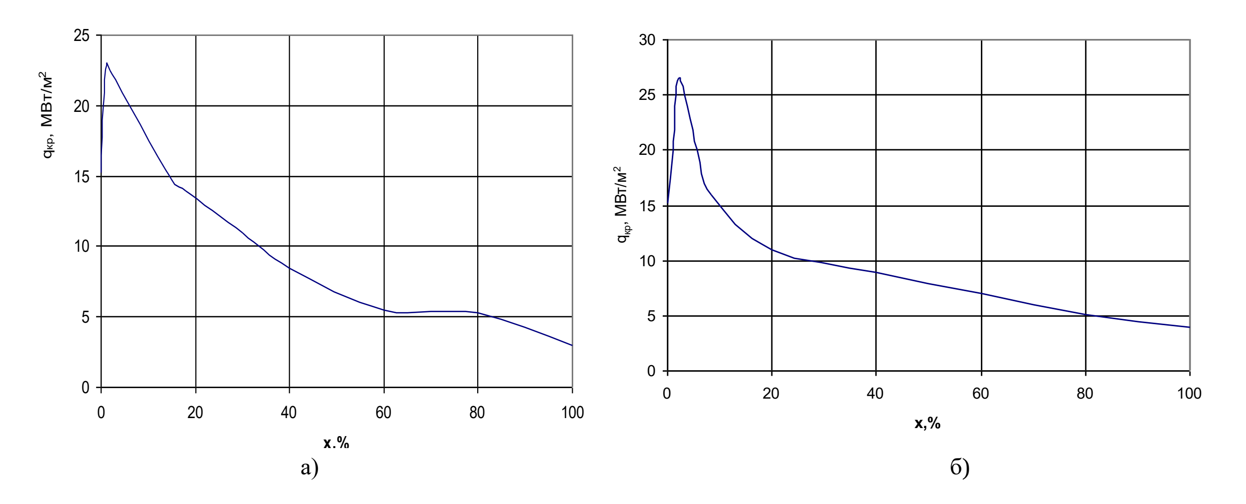


Рис. 2. Критические тепловые потоки как функции состава бинарных систем:
а — вода-н-бутанол, б — вода-н-пентанол

Экспериментальным путем, по среднему значению $q_{кр}$ взятого из серии одинаковых опытов, определялась каждая точка на кривых $q_{кр}(x)$. В системе вода-н-бутанол максимальный (пиковый) критический тепловой поток равный $q_{кр}$=23,03 МВт/м^2 приходится на концентрацию x=1,2% (по массе н-бутанола). В системе вода-н-пентанол пиковый критический тепловой поток $q_{кр}$=26,61 МВт/м^2 приходится на концентрацию x=0,8% (по массе н-пентанола). Определенные из данных опытов величины критических тепловых потоков в кипящих водно-спиртовых смесях показывают, что при одинаковых температурных напорах ΔT в указанных выше составах поток тепловой энергии в 1,5–1,7 раза больше, чем в воде и в 4–5 раз больше, чем в чистом спирте.

В ранних работах [7,8,9] по исследованию критической плотности теплового потока при насыщенном кипении бинарных смесей на платиновом нагревателе диаметром 200мкм приведены кривые зависимости $q_{кр}(x)$ для ряда бинарных смесей жидкостей. Одна, из них представлена на рис. 3. Видно, что при концентрации x=2% н-бутанола в воде обнаруживается максимальный критический тепловой поток.



Рис.3. Зависимость критического теплового потока $q_{кр}$ от состава н-бутанола в воде

Экспериментальные данные подтверждают наличие со стороны жидкой среды ограничения величины критической плотности теплового потока. Это ограничение можно связать с понятием отжима жидкости от поверхности нагрева, рассмотренного в работе [10]. Таким образом, для определения величины критической плотности теплового потока при кризисе кипения насыщенной жидкости (воды) $q_{кр}$, достаточно применить анализ теории размерностей для невязкой жидкости.

В работе [6] Н. Зубр причину кризиса кипения объясняет возникновением нарушения устойчивости по Тейлору. Кроме того возникает нестабильность процесса (по Гельмгольцу) — так называемое возмущение с частотой $v(x, y, t)$. Согласно теории Тейлора, подверженная возмущающему действию поверхность раздела двух жидкостей с различной плотностью в поле тяготения нестабильна. Если к тому же ускорение направлено от более легкой жидкости (пар) к более тяжелой (ускоренное всплытие пузырьков), то возмущение со временем усиливается. Для нахождения условия наступления кризиса Зубр предположил, что плоскость y=0 отделяет пар и возникает возмущение $v(x, y, t) = A \cdot f(x, y)e^{-i\omega\omega}$, которое должно удовлетворять уравнению равновесия жидкости и пара. В этом уравнении ω — частота, которая определяется из граничных условий. Поверхность раздела будет устойчивой, если ω —

действительная величина. В противном случае возмущение будет неограниченно возрастать со временем. Поэтому возникновение кризиса кипения происходит в момент равенства ω нулю. Из граничных условий Зубр определил частоту возмущения в виде:

$$\omega = \left(\frac{\sigma m^3}{\rho + \rho'} - \frac{\rho - \rho'}{\rho + \rho'} \cdot gm \right)^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

где $m = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число, λ — длина волны возмущения. Так называемая «критическая длина волны» по Зубру имеет вид: $\lambda_{кр} = 2\pi\sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho - \rho')}}$. Если длина волны возмущения на поверхности раздела меньше $\lambda_{кр}$, возмущение расти не будет и система будет стабильной. Если же $\lambda > \lambda_{кр}$, то система поверхность жидкость-пар стремится к разрушению. Таким образом, волновая природа процесса кипения объясняет причину кризиса кипения.

Вывод. На основании вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что проблема критической области теплоотдачи связана с существованием предела потока тепловой энергии при кипении бинарных жидких смесей. Плотность поступающей энергии ограничена той средой, через которую она течет. Эта фундаментальная закономерность, установленная авторами, может трактоваться как закон предела потока энергии в среде.

Библиографический список

1. Умов, Н. А. Уравнения движения энергии в телах : дис. …д-ра техн. наук / Н. А. Умов — Одесса, 1874. — 176 с.

2. Капица, П. Л. Эксперимент, теория, практика / П. Л. Капица. — Москва : Наука, 1981.— 495 с.

3. Кожокару, В. В. Исследование критической плотности теплового потока при квазистационарном нагреве поверхностно кипящих бинарных смесей / В. В. Кожокару, Е. В. Лыков // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2015. — №1(80). — С. 48–53.

4. Nukiyama, S. The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmosphere pressure / Nukiyama, S // Iht. J. Heat Mass Transfer, 1984, vol. 27, pp. 959–970.

5. Петерсен, В. К. Получение кривой кипения при регулировании процесса теплоотдачи / В. К. Петерсен, М. Ж. Залук // Труды Американского общества. — 1971. — №4. — С. 90–94.

6. Zuber N. Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer / Zuber N // Dissertation of the degree doctor of philosophy in engineering /−1959. Los Angeles. California

7. W.R. VanWijk., A.S. Vos., S.J.D. Stralen. Heat transfer to boiling liquid mixtures.//Chem. Eng. Sci.- 1956.-№5.-P.68-80.

8. S. J. D. Van Stralen. Iht. J. Heat Mass Transfer, 1966. Vol. 9, p. 995-1006.

9. Van Stralen, S. J. D. The mechanism of nucleate boiling in pure liquids and in binary mixtures-part IV Surface boiling / S. J. D. Van Stralen // Iht. J. Heat Mass Transfer. — 1967. — Vol. 10. — p. 1485–1498.

10. Кружилин, Г. Н. Критическая тепловая нагрузка при кипении жидкости в большом объеме / Г. Н. Кружилин, Е. В. Лыков // Журнал технической физики. — 2000. — т.70, №2. — С.16–19.

References

1. Umov, N. A. Uravneniya dvizheniya energii v telakh: dis. …d-ra tekhn. nauk. [Equations of energy motion in the bodies: Dr.Sci. (Eng.) diss.] Odessa, 1874, 176 p. (in Russian).

2. Kapitsa P.L. Eksperiment, teoriya, praktika.[Experiment, theory, practice.] Moscow: Nauka, 1981, 495 p. (in Russian).

3. Kozhokaru, V.V., Lykov, E.V. Issledovanie kriticheskoy plotnosti teplovogo potoka pri kvazistatsionarnom nagreve poverkhnostno kipyashchikh binarnykh smesey. [Study on critical heat flux density at the quasi-stationary heating of superficially boiling binary mixtures] Vestnik of DSTU, 2015, no. 1(80), pp. 48–53 (in Russian).

4. Nukiyama, S. The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmosphere pressure. Int. J. Heat Mass Transfer, 1984, vol. 27, pp. 959–970.

5. Petersen, V.K., Zaluk, M.Z. Poluchenie krivoy kipeniya pri regulirovanii protsessa teplootdachi. [Getting the boiling curve under the regulation of the heat transfer process.] Journal of Engineering for Industry, 1971, no. 4, pp. 90–94 (in Russian).

6. Zuber N. Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer. Dissertation of the degree doctor of philosophy in engineering, 1959, Los Angeles, California.

7. VanWijk, W.R., Vos, A.S., Stralen, S.J.D. Heat transfer to boiling liquid mixtures. Chem. Eng. Sci., 1956, no. 5, pp. 68-80.

8. Van Stralen, S.J.D. The mechanism of nucleate boiling in pure liquids and in binary mixtures—part I. Int. J. Heat Mass Transfer, 1966, vol. 9, pp. 995-1006.

9. Van Stralen, S.J.D. The mechanism of nucleate boiling in pure liquids and in binary mixtures-part IV. Surface boiling. Int. J. Heat Mass Transfer, 1967, vol. 10, pp. 1485–1498.

10. Kruzhilin, G.N., Lykov, E.V. Kriticheskaya teplovaya nagruzka pri kipenii zhidkosti v bol'shom ob"eme. [Critical heat load in pool boiling.] Technical Physics, 2000, vol. 70, no. 2, pp. 16–19 (in Russian).

Поступила в редакцию 15.09.2016
Сдана в редакцию 15.09.2016
Запланирована в номер 30.09.2016

Received 15.09.2016
Submitted 15.09.2016
Scheduled in the issue 30.09.2016